

Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung  
Technische Hochschule Braunschweig



## Einfluß höherer Spannungszustände von Druckgliedern auf die Schallabstrahlung

von

o. Prof. Dr.-Ing. habil. Th. Kristen  
Dr.-Ing. H.W. Müller  
El.-Ing. R. Palazy

D e z e m b e r 1956

Die Messungen wurden im Auftrag des Herrn Bundes-  
ministers für Wohnungsbau durchgeführt.  
Forschungsauftrag: Az. II - 4115 Nr. 15

*DK 699,844.001.5*

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<u>1. Einleitung</u>	1
1.1 Veranlassung zur Durchführung der Messungen und Ziel der Untersuchungen	1
1.2 Auswahl der Versuchskörper	1
<u>2. Versuchsdurchführung</u>	2
2.1 Theoretische Beziehungen als Grundlagen der Untersuchungen	2
2.2 Praktische Durchführung der Untersuchungen	4
<u>3. Versuchsergebnisse</u>	6
3.1 Versuchskörper bei Zugbelastung	6
3.2 Versuchskörper bei Druckbelastung	8
3.21 Körperschallschwingungen der Druckglieder	8
3.22 Luftschallabstrahlung von Druckgliedern	11
<u>4. Zusammenfassung</u>	19
4.1 Bestimmung der Biegeschwingungen	19
4.2 Bestimmung der Schallabstrahlung	20
Schrifttum	22

## 1. Einleitung

### 1.1 Veranlassung zur Durchführung der Messungen und Ziel der Untersuchungen:

Im Wohnungsbau ist innerhalb der letzten Jahre die Bestrebung erkennbar, die Materialeigenschaften der Bauteile aus wirtschaftlichen Gründen immer mehr auszunutzen. Eine erhöhte Druckbelastung der tragenden Wandbauelemente ist die Folge. Im bauakustischen Sinne ist aber mit einer erhöhten Druckbeanspruchung der Wandbaustoffe die Frage zu klären, ob sich dadurch die Schallabstrahlungseigenschaften dieser Bauelemente verändern. Bei Luftschallmessungen an mehrgeschossigen Wohnbauten konnte bereits festgestellt werden [1], daß die Luftschalldämmung derselben Wandkonstruktion beispielsweise im Erdgeschoß etwa um 2 dB günstiger war als im 8. Obergeschoß. Zunächst wurde angenommen, daß diese Unterschiede auf verschiedene Energieverteilungen bzw. Schallreflexionen in den jeweiligen Geschossen zurückzuführen sind. Diese Annahme fand sich aber durch weitere Untersuchungen nicht bestätigt, zumal auch eine Frequenzverschiebung der Schalldämmung beobachtet wurde. Da in diesem Falle die Versuchswände zugleich tragende Wände waren, lag es nahe, die unterschiedliche Schallabstrahlung im Erdgeschoß und im 8. Obergeschoß auf eine ungleiche Lasteinwirkung zurückzuführen.

In den folgenden Untersuchungen sollte die Schallabstrahlung von Wandbauelementen speziell in Abhängigkeit von ihrer Zug- bzw. Druckbeanspruchung bestimmt werden.

Zur Bestimmung der Spannungseinflüsse auf die Schallabstrahlung erschien es zweckmäßig, die Grundlagen zunächst an Modellversuchen zu klären, und erst dann an Bauteilen der Praxis die Untersuchungen durchzuführen.

### 1.2 Auswahl der Versuchskörper

Die Voruntersuchungen wurden an stabförmigen Versuchskörpern aus Beton und Porenbeton von 5 x 5 x 150 cm durchgeführt,

und gemäß Abb. 1 unterschiedlich auf Zug beansprucht. Um Werte über ein etwaiges unterschiedliches elastisches Verhalten der Versuchskörper zu gewinnen, wurde der dynamische Elastizitätsmodul bei verschiedenen Laststufen aus den entsprechenden Wellenlängenmessungen bestimmt. Falls nämlich durch eine statische Zug- oder Druckbeanspruchung Veränderungen der Materialeigenschaften eintreten, so müssen sich diese auch in einer Veränderung des dynamischen Elastizitätsmoduls bemerkbar machen. Da die genannten Versuchskörper mit zentrischem Druck sehr schwer zu belasten waren, wurden für die Druckversuche Säulen von 24 . 24 . 230 mm aus Beton, Porenbeton und Mauerziegeln verwendet. An diesen Säulen ist dann sowohl der dynamische Elastizitätsmodul als auch die Luftschallabstrahlung in Abhängigkeit von der Druckbeanspruchung untersucht.

Außerdem wurde die Luftschallabstrahlung noch an einer Wandfläche aus Mauerziegeln mit den Abmessungen 2,00 x 2,30 x 0,24 m bei verschieden großer Belastung gemessen.

## 2. Versuchsdurchführung

### 2.1 Theoretische Beziehungen als Grundlage der Untersuchungen

Die Luftschallabstrahlung steht mit den Körperschallschwingungen der Bauteile in direktem Zusammenhang; denn die Schwingungen der Masseteilchen sind die Ursache der Schallabstrahlung. Daher ist es erforderlich, zur Feststellung von eventuellen Änderungen der Materialeigenschaften, die durch eine statische Beanspruchung entstehen, das Verhalten der Körperschallschwingungen zu überprüfen.

In Bauteilen erfolgt die Schallausbreitung vorwiegend durch Biegeschwingungen.

Die Differentialgleichung der Biegeschwingungen geht zurück auf die Transversalschwingungen in prismatischen Stäben [2] .

Die Bewegungsgleichung der einzelnen Masseteilchen eines Stabes ist eine Differentialgleichung 4. Ordnung:

$$\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - k^4 v = 0$$

worin die 4. Potenz der Wellenzahl  $k$ ,  $k^4 = \omega^2 \frac{M}{B}$ , gesetzt wird. In dieser Gleichung sind :  $v$  die Schnelle der Massenpunkte,  $\omega$  die Kreisfrequenz,  $M$  die Masse je Längeneinheit und  $B$  die Biegesteife. Die Biegesteife  $B$  ist definiert als Produkt aus dem Elastizitätsmodul  $E$  und dem Trägheitsmoment  $J$  :  $E \cdot J$ . Das auf die Breiten - einheit bezogene Trägheitsmoment beträgt  $J = h^3/12$ . Aus der obigen Differentialgleichung ergibt sich die folgende Beziehung:

$$k = \sqrt[4]{\omega^2 \cdot \frac{M}{B}}, \text{ oder, da für die Wellenlänge } \lambda = \frac{2\pi}{k}$$

gilt, erhält man für die Wellenlänge

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{2\pi}{f}} \cdot \sqrt[4]{\frac{B}{M}} \quad (1)$$

Bei bekannter Wellenlänge läßt sich aus dieser Gleichung das Verhältnis  $B/M$  bzw. der dynamische Elastizitätsmodul des Versuchskörpers bestimmen; denn falls durch eine Druck- oder Zugbeanspruchung der Versuchskörper Veränderungen der elastischen Eigenschaften eintreten, so müssen sich diese auch in einer Veränderung der Biegewellenlänge äußern. Bei der mit Hilfe dieser Beziehung vorgenommenen Berechnung des Elastizitätsmoduls ist es erforderlich, die Biegewellenlänge möglichst genau zu bestimmen.

Die Biegewellenlänge der Versuchskörper ist sowohl für die Eigenschwingungen als auch für erzwungene Schwingungen beliebiger Frequenz bestimmt worden.

Es ist bekannt [3], daß die Eigenschwingungsfrequenz oder die Resonanzfrequenz von Säulen oder stabförmigen Versuchskörpern sich mit der Größe der Belastung ändert. Diese Frequenzänderung erfolgt nach der folgenden Beziehung:

$$f = f_0 \sqrt{1 - \frac{\sigma}{\sigma_k}} = f_0 \sqrt{1 - \frac{\sigma \cdot l^2}{\pi^2 E \cdot J}} \quad (2)$$

Worin bedeuten :

$f_0$  = Eigenschwingungsfrequenz ohne Belastung

$\sigma$  = Normalkraft

$\sigma_k$  = Eulersche Knicklast ;  $\sigma_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{l^2}$

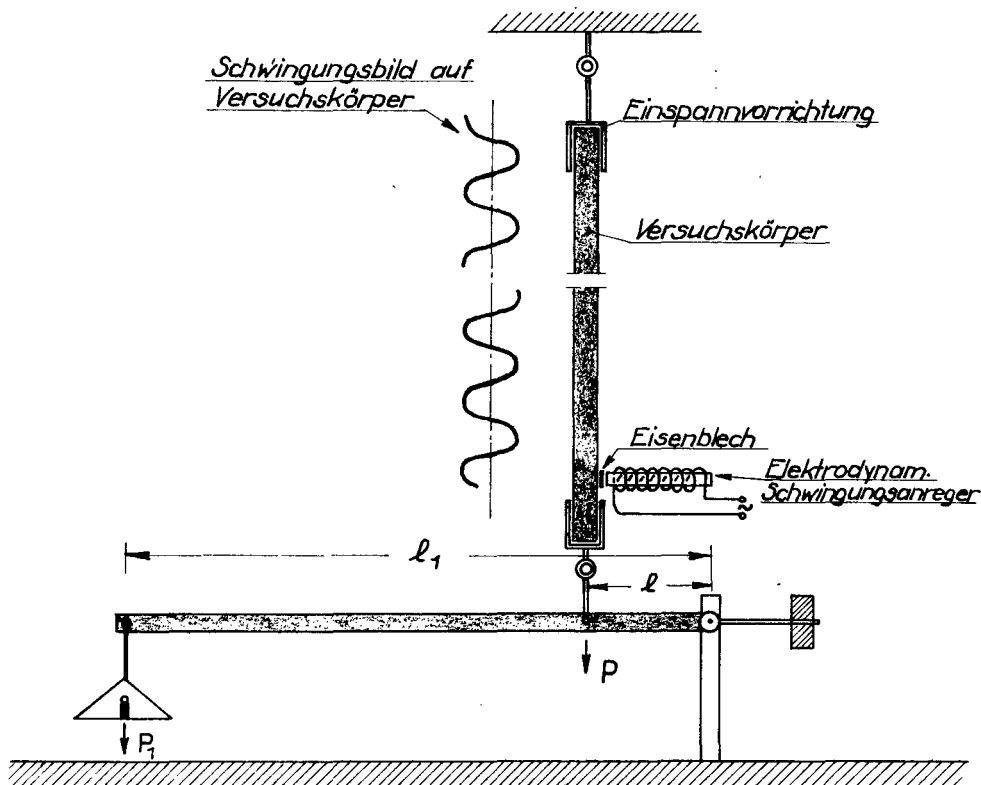
$E \cdot J$  = Biegesteife (Produkt aus Elastizitätsmodul u. Trägheitsmoment)

$l$  = Länge der Versuchskörper

Aus der Beziehung (2) ist zu entnehmen, daß sich mit zunehmender Normalkraft (Druck) die Eigenfrequenz des Versuchskörpers zu tieferen Werten verschiebt, während bei einer negativen Normalkraft ( $\sigma < 0$  = Zugbelastung) eine Verschiebung der Eigenfrequenz nach höheren Werten eintritt.

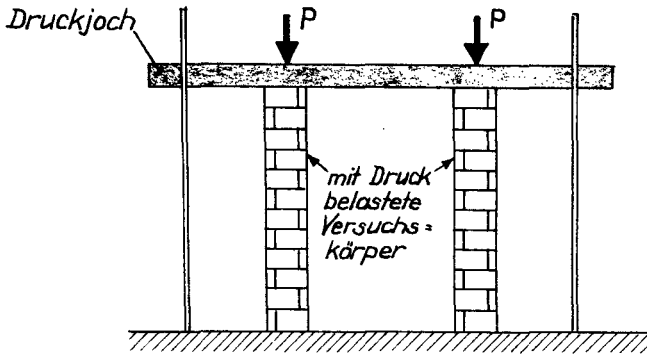
## 2.2 Praktische Durchführung der Untersuchungen

Zur Feststellung der Biegewellenlänge bei der Zugbelastung wurden die stabförmigen Versuchskörper an beiden Enden in eine Haltevorrichtung gespannt und mit einem belastenden Hebelarm beansprucht. Die Schwingungsanregung erfolgte durch ein elektromagnetisches System. (s. Abb. 1)



**Abb. 1** Versuchsanordnung zur Überprüfung der Zugelastizität an stabförmigen Versuchskörpern.

Im Gegensatz zu den stabförmigen Versuchskörpern (5 x 5 cm Querschnitt) wurden die Säulenkörper (24 x 24 cm Querschnitt) und die Versuchswandfläche der Praxis entsprechend mit einer Druck-Presse belastet. (s. Abb. 2)



Diese Säulen wurden mit einem piezoelektrischen Anregungssystem bei den Resonanzfrequenzen oder bei einer Vielzahl von Frequenzen ("weißes Geräusch") zu Biegeschwingungen angeregt.

Abb. 2 Schematische Darstellung der mit Druck belasteten Versuchskörper (Säulen)

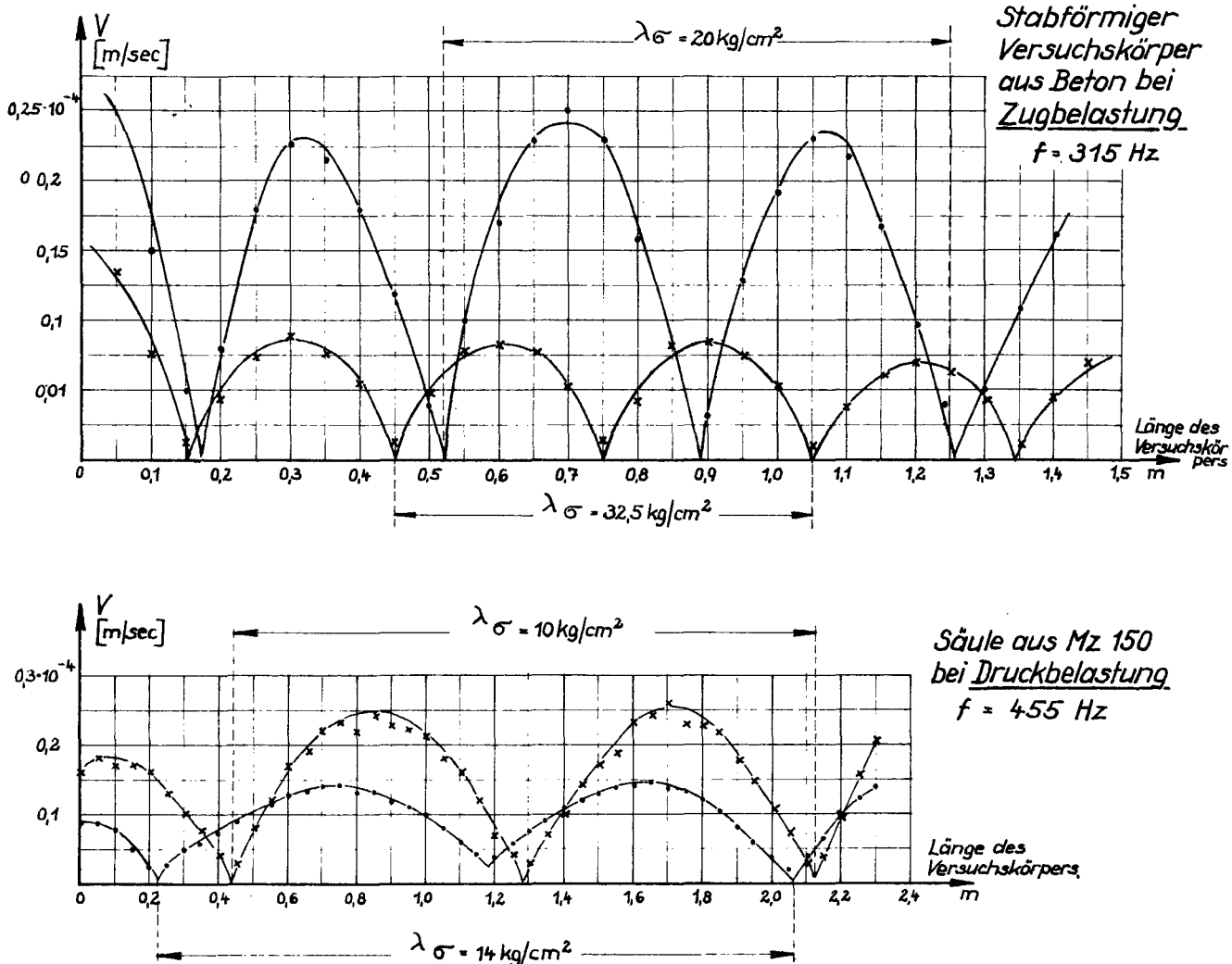


Abb. 3 Biegewellenlängenänderung verschiedener Versuchskörper bei Zug- und Druckbelastung

Sowohl bei den Zug- als auch bei den Druckversuchen sind die Schwingungsamplituden mit einem piezoelektrischen Empfangssystem bestimmt worden. Um den jeweiligen Schwingungsverlauf möglichst sicher zu erfassen, wurden die Schnellewerte, die absolut abzu- lesen waren, auf den Versuchskörpern jeweils in 5 cm Abstand be- stimmt. Aus der Auftragung dieser Schnellewerte über die Länge der Versuchskörper lassen sich die entsprechenden Biegewellen- längen bestimmen. Werden z.B. die Säulen ohne Belastung unter- sucht, so sind damit die Schwingungen eines einseitig eingespann- ten Stabes und bei Belastungen die Schwingungen eines beidseitig eingespannten Stabes verwirklicht. Ein stabförmiger unbelasteter Versuchskörper zeigt bei einseitiger und beidseitiger Einspannung eine Veränderung im Schwingungsbild gegenüber dem freischwingenden [4]. Diese Annahme konnte durch die Untersuchungen bestätigt werden. Bei beidseitiger Einspannung nehmen die Amplituden im Gegensatz zum freischwingenden Körper kleinere Werte an. Ein Beispiel der Schnelle-Messungen bei verschiedener Zug- und Druck- belastung ist in der Abb. 3 angeführt.

### 3. Versuchsergebnisse

#### 3.1 Versuchskörper bei Zugbelastung

Durch Zugversuche sollte geklärt werden, ob die elastischen Eigenschaften der geprüften Baustoffe durch Überlagerung von statischen und dynamischen (Schwingungen) Belastungsformen verändert werden.

Wird die Biegewellenlänge der einzelnen Versuchskörper - es waren jeweils prismatische Stäbe (5 x 5 cm Querschnitt, 1,5 m Länge) - bei unterschiedlicher Zugbeanspruchung bestimmt, so ergeben sich die in der Abb. 4 dargestellten Ergebnisse. Als Ordinaten sind die Differenzen der Wellenlängen bei den Normal- spannungen von 0 und  $\sigma$  ( $\text{kg/cm}^2$ ) angegeben.

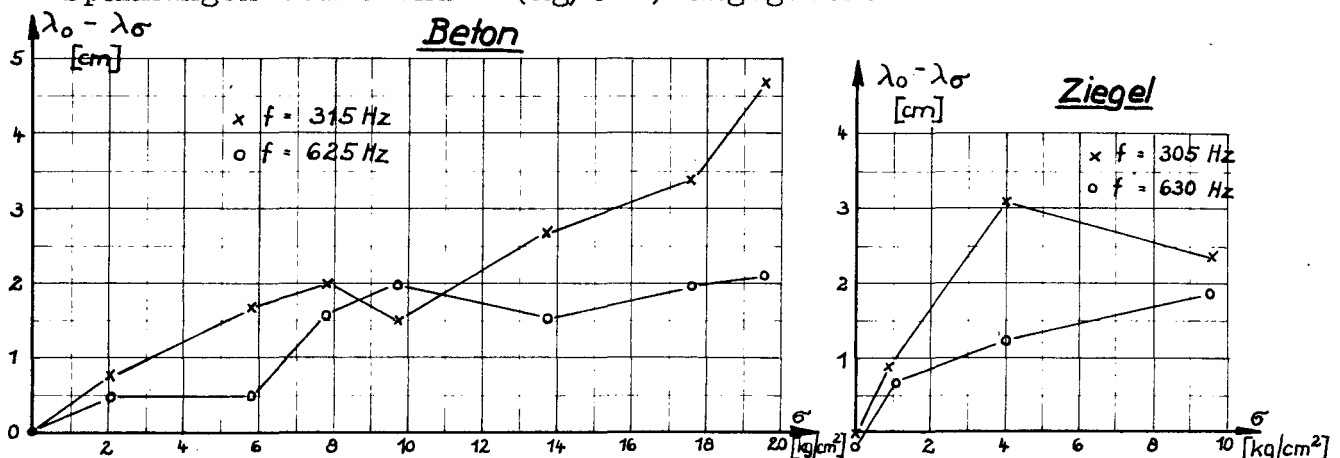


Abb. 4 Differenz der Wellenlängen bei Beton- und Ziegel- Stäben bei verschiedener Zugbelastung.



Aus den Meßwerten für diese beiden Baustoffe ist zu entnehmen, daß die Biegewellenlänge mit zunehmender Zugbelastung geringer wird. Auch ist die Änderung der Biegewellenlänge für niedrigere Frequenzwerte größer als für höhere Frequenzen.

Das wichtigste Ergebnis der Voruntersuchungen, daß nämlich die Wellenlänge mit zunehmender Zugbelastung kleiner wird, soll zunächst besprochen werden:

Die Beziehung  $\lambda = \sqrt{\frac{2\pi}{f}} \cdot \sqrt[4]{\frac{E \cdot J}{M}}$  gilt für Versuchskörper, deren Querabmessungen klein gegenüber der Wellenlänge sind, als experimentell gesichert. Sobald sich die Wellenlänge bei feststehender Anregungsfrequenz  $f$  ändert, könnten sich nach der angegebenen Beziehung nur die Größen  $E$ ,  $J$  oder  $M$  ändern. Das Trägheitsmoment  $J$  und die Masse je Längeneinheit müssen aber als absolute Konstante für den jeweiligen Versuchskörper (Baustoff) angesehen werden, denn die Längenänderungen betragen bei den größten angewandten Belastungsstufen maximal 1 %; somit könnte sich bei einer Zugbeanspruchung nur der Elastizitätsmodul  $E$  ändern.

Bekanntlich ist zwischen dem statischen und dem dynamischen Elastizitätsmodul zu unterscheiden. Durch bisher unveröffentlichte Untersuchungen des Instituts [1] ist festgestellt, daß der dynamische Elastizitätsmodul von Baustoffen stets größer als der statische Elastizitätsmodul wird. Sobald die Baustoffe Schwingungen ausführen, ist in jedem Falle der dynamische Elastizitätsmodul anzuwenden, d.h. auch bei einer Wechschelwingungsbeanspruchung der Versuchskörper ohne Zugbeanspruchung. Werden auf den Versuchskörpern - zusätzlich zu der statischen Belastung - noch Wechschelwingungen überlagert, so ist auch der dynamische Elastizitätsmodul anzuwenden.

Der Elastizitätsmodul eines gleichmäßig aufgebauten festen Körpers wird von zwei unabhängigen Konstanten bestimmt, nämlich von der Poisson'schen Zahl  $\mu$  und von dem Torsions- oder Gleitmodul  $G$  nach  $E = 2 G (1 + \mu^2)$ . Da diese beiden Größen sowohl für den unbelasteten Versuchskörper, als auch für den statisch belasteten Versuchskörper als konstant anzusehen sind, muß auch der dynamische Elastizitätsmodul  $E$  für beide Belastungsfälle als konstant gelten.

Die Änderung der Biegewellenlänge könnte daher nur durch das Auftreten eines additiven oder subtraktiven Zusatzgliedes, dessen Größe von der angelegten Zugspannung abhängig ist, hervorgerufen werden. Bei einer Zugbeanspruchung würde die Beziehung (1) die folgende Form erhalten:

$$\lambda = \sqrt{\frac{2 \pi}{f}} \cdot 4 \sqrt{\frac{E \left(1 - \frac{\alpha}{E}\right) \cdot J}{M}} \quad (3)$$

das Zusatzglied  $\alpha$  ist druckabhängig und nimmt bei der Zugspannung  $\sigma = 0$  den Wert Null an.

Es war von vornherein anzunehmen, daß bei diesen Untersuchungen eine Resonanz-Frequenz-Verschiebung für den schwingenden Versuchskörper nach Gleichung (2) zu erwarten war. Daher wurde die Übereinstimmung zwischen Sendefrequenz und Empfangsfrequenz immer mit dem Oszillographen überprüft.

### 3.2 Versuchskörper bei Druckbelastung

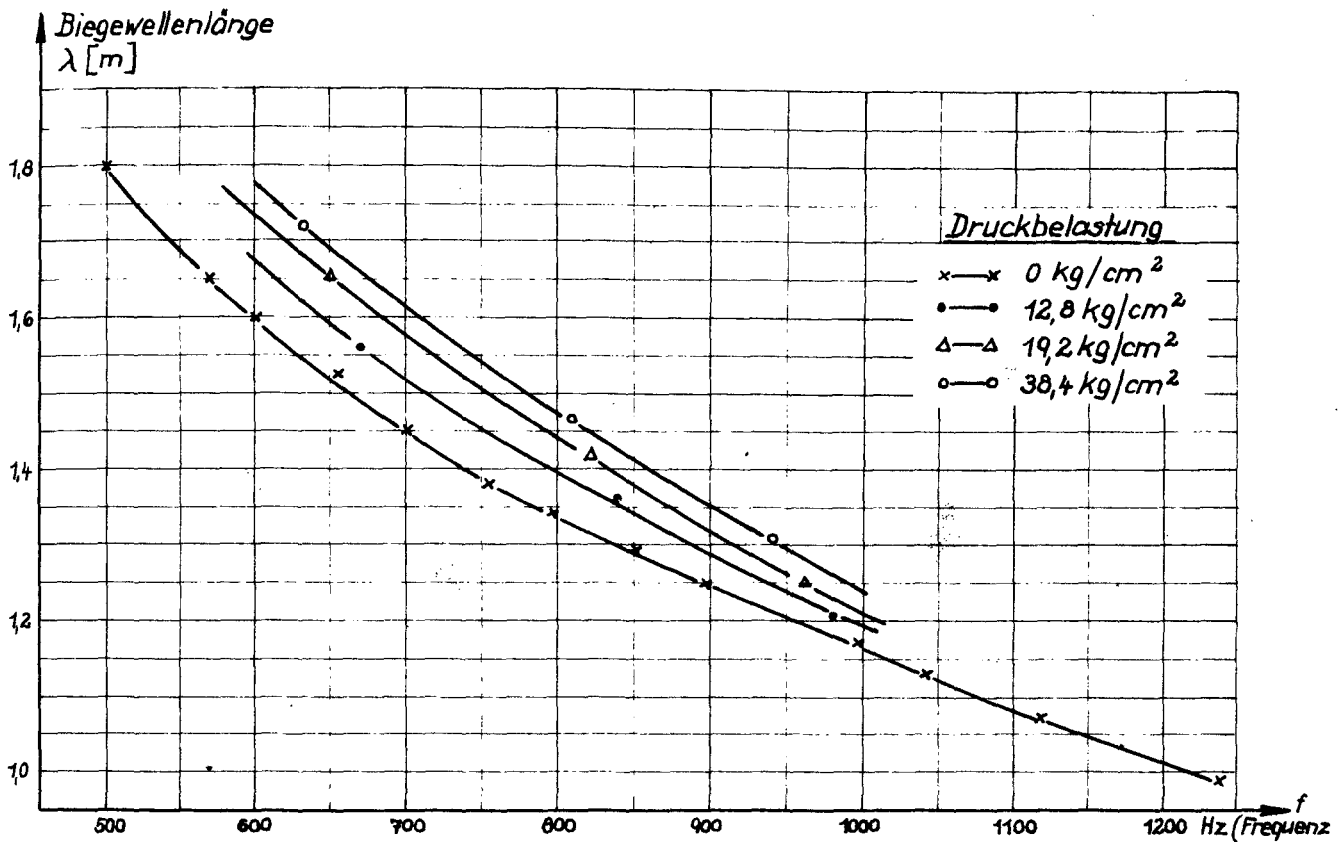
Für Druckbelastungsversuche wurden quadratische Säulen (24 x 24 x 230 cm) aus verschiedenen Baustoffen und ein Wandelement (24 x 200 x 230 cm) aus Mauerziegeln zentrisch durch eine Druckpresse belastet.

An diesen Versuchskörpern sind bei verschiedenen Druckstufen sowohl die Körperschallschnellen als auch die Luftschallabstrahlung bei Körperschallanregung bestimmt worden.

#### 3.21 Körperschallschwingungen der Druckglieder

Die Schwingungsanregung (erzwungene Schwingungen) wurde bei verschiedenen Frequenzen und bei verschiedenen Laststufen vorgenommen, und die Biegewellenlängen aus den für die einzelnen Säulenpunkte erhaltenen Schnelle-Werten ermittelt. Um die zu erwartende Wellenlängenänderung bei den verschiedenen Drucklaststufen möglichst eindeutig festzulegen, wurden bei möglichst vielen Frequenzwerten die entsprechenden Wellenlängen bestimmt.

Für eine Betonsäule sind die erhaltenen Meßwerte in der Abb. 5 eingetragen.



**Abb. 5** Biegewellenlänge einer Beton-Säule (24 x 24 x 230) bei verschiedener Druckbeanspruchung.

In dieser Abb. 5 ist eine eindeutige Zunahme der Biegewellenlänge mit zunehmender Druckbelastung festzustellen.

Da, im Gegensatz zu einer Zugbeanspruchung die Wellenlänge mit zunehmender Druckbeanspruchung wächst, ist für das Zusatzglied der Beziehung (3),  $\alpha$ , das zunächst kurz als "scheinbare Zusatzelastizität" bezeichnet werden soll, hier ein positives Vorzeichen anzusetzen.

$$\lambda = \sqrt{\frac{2 \pi}{f}} \quad 4 \sqrt{\frac{E \left( 1 + \frac{\alpha}{E} \right) \cdot J}{M}} \quad (4)$$

$\alpha$  ist wieder druck- und materialabhängig. Die Werte von  $\alpha$  ("scheinbare Zusatzelastizität") lassen sich aus den Wellenlängen für die untersuchte Betonsäule berechnen. Bei 800 Hz waren folgende Werte ablesbar oder es können nach der obigen Gleichung berechnet werden:

T a f e l 1

Druck- belastung kg/cm <sup>2</sup>	Biege- wellen- länge $\lambda$ (m)	Zunahme von $\lambda$ in %	dynamischer Elastizitätsmodul $E_{dyn}$ kg/cm <sup>2</sup>	scheinbare Zusatz-Elastizität $\alpha$ kg/cm <sup>2</sup>
0	1,34	0	$2,35 \cdot 10^5$	0
12,8	1,39	3,7	$2,35 \cdot 10^5$	$0,41 \cdot 10^5$
19,2	1,44	7,5	$2,35 \cdot 10^5$	$1,03 \cdot 10^5$
38,4	1,48	10,4	$2,35 \cdot 10^5$	$1,17 \cdot 10^5$

Wird der dynamische E-Modul aus den Wellenlängenwerten, die an Betonstäben (5 x 5 cm) entsprechender Festigkeit ohne Belastung \*) gemessen wurden, berechnet, so wird für 800 Hz erhalten:  $E_{dyn} = 2,24 \cdot 10^5$  kg/cm<sup>2</sup>. Die Übereinstimmung dieser Werte für Stäbe und Säule ist gut.

Aus Tafel 1 ist zu entnehmen, daß eine Zunahme der Biegewellenlänge, die auf eine erhöhte Druckbelastung einer Betonsäule zurückzuführen ist, eine bedeutende Zunahme der "scheinbaren Zusatzelastizität" verursacht. In dem gewählten Druckbereich beträgt diese bis 50% des dynamischen Elastizitätsmoduls.

Gleiche Beobachtungen wurden an Säulen derselben Abmessungen aus Mauerziegeln bzw. Porenbetonsteinen gemacht. An den zuletzt genannten Säulen sind die Wellenlängen in Abhängigkeit von der Druckbelastung bei wenigen ausgeprägten Frequenzwerten bestimmt, da jede beliebige erzwungene Schwingung keine exakten Meßerte lieferte. Die erhaltenen Meßwerte, s. Tafel 2.

\*) Die Belastungen werden jeweils für den untersuchten Baustoff in kg/cm<sup>2</sup> angegeben.

T a f e l 2

Druck- bela- stung <sub>2</sub> kg/cm <sup>2</sup>	Säule aus Mz 150				Säule aus Porenbetonsteinen			
	Biegewellen- länge von (m)		Zunahme von $\lambda$ in %		Biegewellen- länge von (m)		Zunahme von in %	
	455 Hz	995 Hz	455 Hz	995 Hz	330 Hz	860 Hz	330 Hz	860 Hz
0	1,40	0,930	0	0	1,60	0,825	0	0
6,4	1,49	0,950	6,4	2,2	1,65	0,880	3,2	6,7
12,8	1,58	0,960	12,8	3,2	1,69	0,940	5,6	14,0
25,6	1,68	0,975	20,0	4,9	1,74	0,960	8,8	16,4

Auch aus den Werten der Tafel 2 ist zu ersehen, daß die Biegewellenlänge mit zunehmender Druckbelastung größer wird. Jedoch ist die Zunahme der Wellenlänge frequenz- und materialabhängig. Durch die Werte der Tafel 2 wird nochmals bestätigt, daß mit zunehmender Druckbelastung die "scheinbare Zusatzelastizität" der Druckglieder erhöht wird.

Da der Elastizitätsmodul eine Materialkonstante darstellt, und die Gefügeänderungen bei den gewählten Belastungen vermutlich vernachlässigt werden können, muß diese "scheinbare Zusatzelastizität" mit den statischen Vorspannungen innerhalb der Versuchskörper in Zusammenhang gebracht werden. Bei Anwendung einer statischen Vorspannung wird nach außen der Anschein einer Veränderung der elastischen Materialeigenschaften erweckt. Diese Veränderung ist lediglich eine Folgeerscheinung der statischen Vorspannung, die sich im gleichen Sinne auswirkt, wie eine Änderung der Elastizitätseigenschaften.

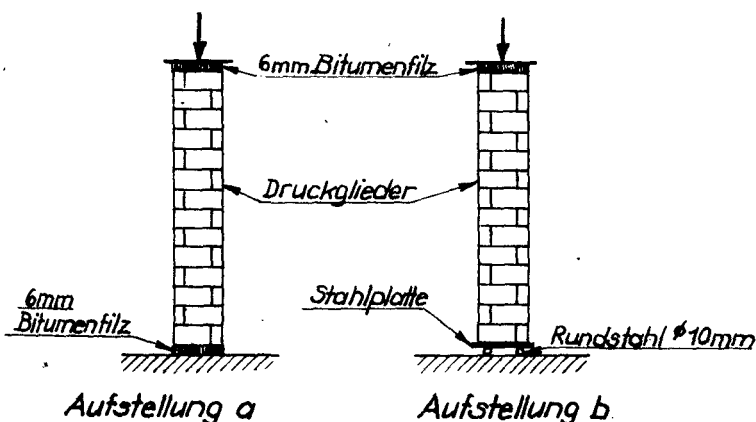
### 3.22 Luftschallabstrahlung von Druckgliedern

Auf Grund der Veränderungen, die bei den schwingungstechnischen Untersuchungen festgestellt wurden, war zu erwarten, daß bei verschiedenen Belastungsstufen der Druckglieder auch eine unterschiedliche Luftschallabstrahlung festzustellen ist. Diese Luftschallabstrahlung wurde an Säulen (24 x 24 x 230 cm) und an einem Wandelement (24 x 200 x 230 cm) überprüft.

Zur Messung des Luftschallpegels wurden die Druckglieder körperschallmäßig zu Schwingungen angeregt und der abgestrahlte Luftschallpegel über die gesamte Länge der Versuchskörper durch ein sich mit konstanter Geschwindigkeit in vertikaler Richtung bewegendes Mikrofon in ca. 70 cm Abstand von den Druckgliedern registriert.

Da möglicherweise nur geringe Pegelunterschiede für die verschiedenen Laststufen zu erwarten waren, wurde die Schallstärke jeweils mit einem Pegelschreiber für die parallel zum Versuchskörper gelegenen Meßpunkte aufgezeichnet, so daß eine möglichst hohe Meßgenauigkeit erzielt werden konnte. Als Bezugsschalldruck ist  $p_0 = 2 \cdot 10^{-4} \mu$  bar gewählt worden.

Ferner konnte festgestellt werden, daß die Luftschallabstrahlung der Druckglieder von der Auflagerung beeinflusst wird. Demnach waren für die Beurteilung der Ergebnisse zwei verschiedene Aufstellungsarten der Druckglieder zu unterscheiden:



#### Aufstellung a:

Druckglieder direkt auf fester Unterlage. Die Säulen bzw. das Wandelement wurden mit einer Zwischenlage aus 6 mm Bitumenfilz auf eine massive Unterlage gestellt (s.Abb.6)

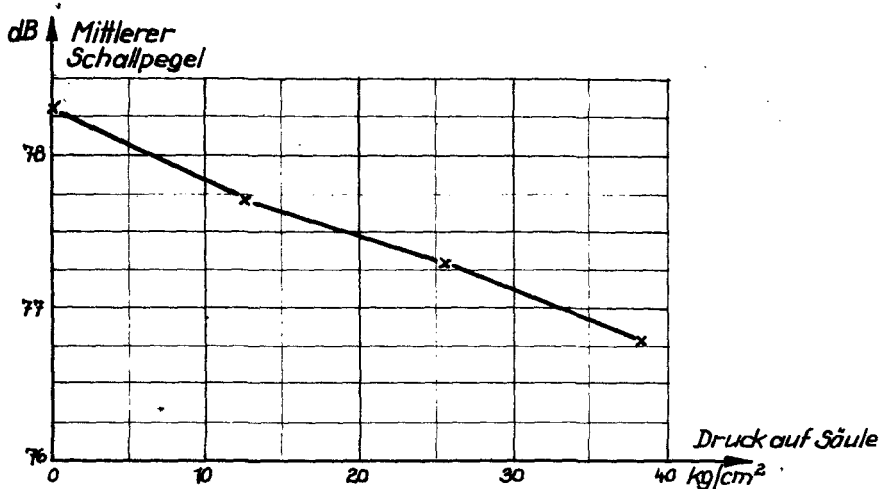
**Abb. 6** Verschiedene Aufstellungsarten der Druckglieder

Aufstellung b: Die Druckglieder wurden auf eine Stahlplatte gestellt. Zwischen Stahlplatte und Unterlage wurden zwei Rundstähle  $\varnothing 10$  mm gelegt. Durch diese Aufstellungsart wird einmal der Schallenergieabfluß nach unten auf einen geringen Querschnitt begrenzt und zum anderen wird durch die Rundstähle eine Gelenkwirkung verbunden.

Die Versuchsergebnisse für diese beiden Aufstellungsarten werden in den folgenden Ausführungen getrennt behandelt.

Zunächst wurden die Versuchskörper (Säulen) mit einem weitgehend konstanten "weißen Geräusch" angeregt, d.h. die Versuchskörper führten entsprechend der Anregung unendlich viele erzwungene Schwingungen aus. Diese Schwingungen strahlten andererseits die Versuchskörper wieder als Luftschall ab.

Bei gleichstarker Körperschallanregungs-Leistung konnte an



einer Betonsäule im Mittel der in Abb. 7 dargestellte Luftschallpegel bei verschiedener Druckbelastung festgestellt werden. Die Säule wurde bei diesen Untersuchungen auf eine feste Unterlage gestellt.

**Abb. 7** Schallabstrahlung einer Betonsäule bei verschiedener Druckbelastung. Anregung und Empfang: "weißes Geräusch"

Aus dem Ergebnis ist zu entnehmen, daß das abgestrahlte Gesamtgeräusch mit zunehmender Druckbelastung abnimmt. Die Abnahme des Schallpegels erfolgt annähernd linear. Bei einer Belastung von z.B.  $38,4 \text{ kg/cm}^2$  nimmt der Schallpegel gegenüber dem unbelasteten Zustand um 1,5 dB ab.

Wurden dagegen die gleichen Untersuchungen an einer verputzten Säule aus Mauerziegeln durchgeführt, so betrug die Abnahme des Luftschallpegels zwischen einer Belastung von  $0 \text{ kg/cm}^2$  und einer solchen von  $38,4 \text{ kg/cm}^2$  2,6 dB für ein "weißes Geräusch". (s. Abb. 8). Im Vergleich zu den Messungen an der Betonsäule ist die Schallabstrahlung der Mauerziegelsäule mehr druckabhängig. Diese Beobachtung deckt sich mit den durchgeführten Wellenlängen-Bestimmungen, denn die Biege- wellenlängen-Änderungen der Mauerziegelsäule waren bei entsprechenden Druckbelastungen größer als die der Betonsäule.

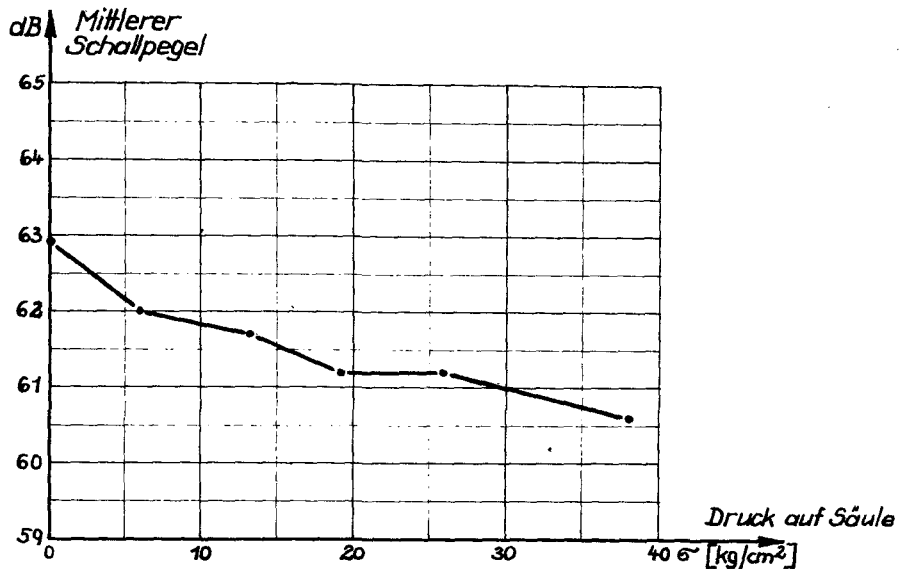


Abb. 8 Schallabstrahlung einer verputzten Mauerziegelsäule (Anregung und Empfang, "weißes Geräusch")

Die durchgeführten Biegewellenlängen-Messungen an den Versuchskörpern ergaben für die verschiedenen Laststufen eine Abhängigkeit der Wellenlängen von der Frequenz. Es ist daher zu erwarten, daß auch die Luftschallabstrahlung der Versuchskörper bei den gewählten Druckbelastungen eine unterschiedliche Frequenzverteilung besitzt. Diese Annahme wird außerdem durch die Tatsache bekräftigt, daß die Resonanzfrequenz sich mit einer zunehmenden Druck- (Zug) -Belastung zu tieferen (höheren) Werten verschiebt. Daher mußten bei den weiteren Messungen die Druckglieder mit einem "weißen Geräusch" körperschallmäßig angeregt werden, um die abgestrahlten Schallpegel frequenzabhängig - zumindest in Oktav-Bandbreiten - bei unterschiedlichen Druckbelastungen zu bestimmen. An der Betonsäule wurden diese Messungen für beide Aufstellungsarten (s. Abb. 6) durchgeführt. Die Ergebnisse für die Schallpegel - es sind Mittelwerte aus jeweils 21 Einzelwerten - sind in die folgenden Tafel 3 und 4 eingetragen. Es konnte dabei festgestellt werden, daß die Schallabstrahlung sich nicht verändert, wenn die Säulen am unteren Ende oder in der Mitte angeregt werden.



T a f e l 3

Aufstellungsart a: Feste Unterlage

Mittel- Frequenz des Emp- fangs- Filters	Mittlerer Schallpegel bei Druckbelastung:			
	0 kg/cm <sup>2</sup>	12,8 kg/cm <sup>2</sup>	25,6 kg/cm <sup>2</sup>	38,4 kg/cm <sup>2</sup>
350 Hz	51,56 dB	50,60 dB	50,26 dB	50,43 dB
500 Hz	55,62	57,45	57,02	57,98
700 Hz	69,44	66,78	66,58	66,78
1000 Hz	72,81	70,88	69,68	69,64
1400 Hz	72,24	69,95	68,51	68,50
2000 Hz	67,42	65,31	64,57	64,34
2800 Hz	63,34	61,02	60,49	60,25
Mittelwert über alle Frequenz- werte	64,63 dB	63,14 dB	62,44 dB	62,56 dB

T a f e l 4

Aufstellungsart b: Untergelegte Rundstähle auf fester Unterlage

Mittel- Frequenz des Emp- fangs- Filters	Mittlerer Schallpegel bei Druckbelastung:			
	0 kg/cm <sup>2</sup>	12,8 kg/cm <sup>2</sup>	25,6 kg/cm <sup>2</sup>	38,4 kg/cm <sup>2</sup>
350 Hz	54,60 dB	51,03 dB	50,33 dB	50,57 dB
500 Hz	61,71	62,33	61,48	61,18
700 Hz	71,24	70,28	70,54	70,39
1000 Hz	72,28	70,31	71,00	71,22
1400 Hz	68,84	66,69	67,68	67,56
2000 Hz	65,24	65,00	64,50	64,75
2800 Hz	63,82	60,99	60,88	60,86
Mittelwert über alle Frequenz- werte	65,39 dB	63,80 dB	63,77 dB	63,79 dB

Da die Anregungsleistung für die in Tafel 3 und 4 genannten Aufstellungsarten konstant gehalten wurde, sind diese Meßwerte direkt miteinander vergleichbar. Aus diesen Werten ist zu entnehmen, daß die Schallabstrahlung für beide Aufstellungsarten mit zunehmender Druckbelastung geringer wird. Die Schall-

pegelabnahme ist sowohl für die jeweiligen Frequenzwerte als auch für die beiden Aufstellungsarten der Säule verschieden.

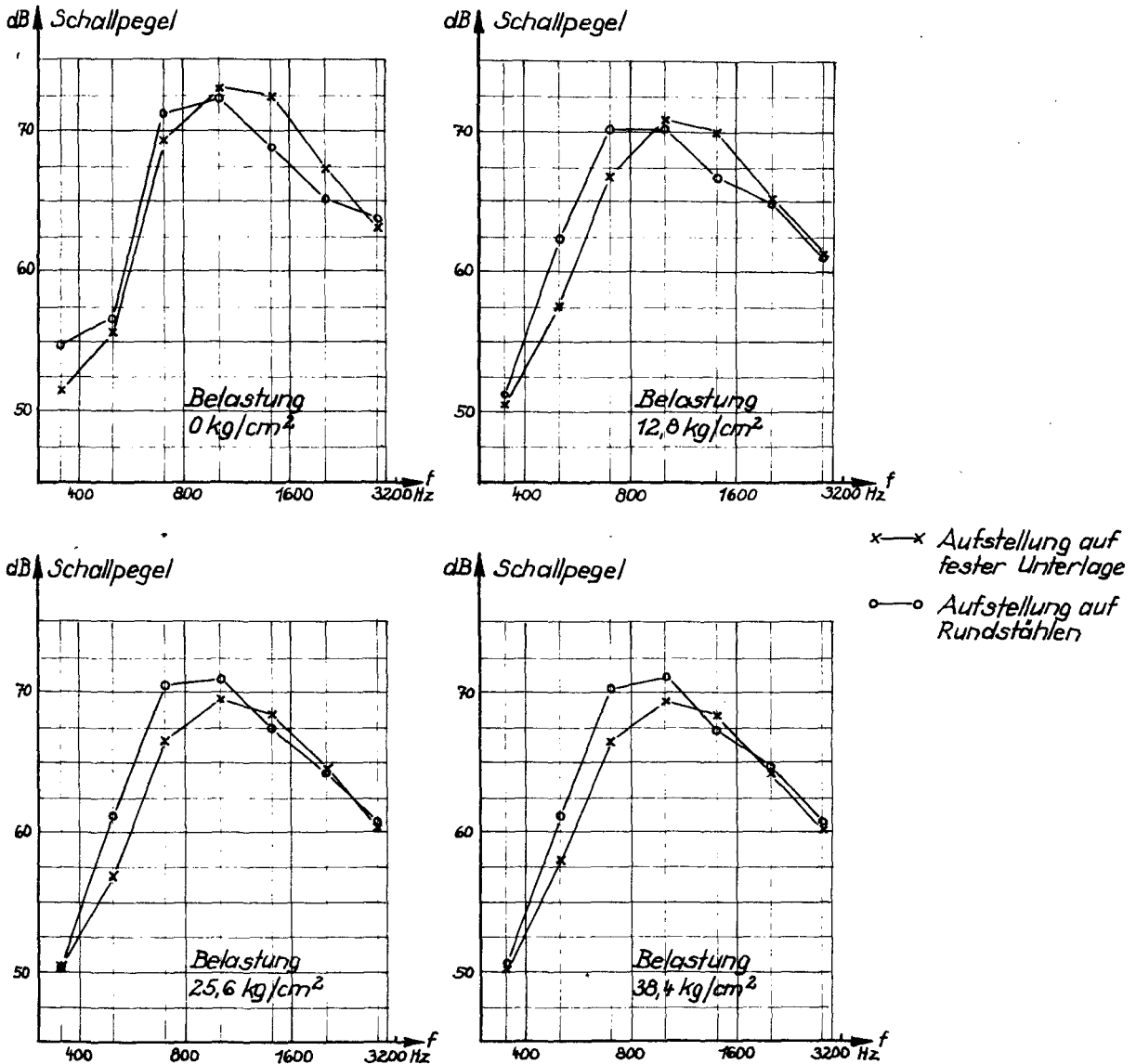


Abb. 9 Frequenzabhängiger Schallpegelverlauf bei verschiedenen Drucken und Aufstellungsarten einer Betonsäule.

Werden die Meßergebnisse graphisch aufgetragen (s. Abb. 9), so ist für diese Aufstellungsarten ein unterschiedliches Abstrahlverhalten erkennbar. Sobald die Säule auf Rundstähle gestellt wird, so ist die Luftschallabstrahlung im Mittel bei allen Belastungsfällen größer als bei einer Aufstellung der Säule auf fester Unterlage. Mit der Aufstellung auf Rundstählen ist

eine erhöhte Luftschallabstrahlung bei allen Belastungsstufen bis zu einer Frequenz bis 1000 Hz verbunden.

Da für beide Messungen die Anregungsleistung konstant gehalten und auch die Empfangsbedingungen nicht verändert wurden, können die festgestellten Beobachtungen wie folgt erklärt werden.

Die Schwingungsenergie der Säule wird an ihrem oberen und unteren Ende an die berührenden (Bau-) Teile abgeleitet. Die unter die Säule gelegten Rundstähle verursachen gegenüber einer Aufstellung auf fester Unterlage eine erhebliche Querschnittsverminderung, und somit wird der Abfluß der Schwingungsenergie stark herabgesetzt. Auf diese Weise ist der Energiefluß innerhalb der Säule und damit die Schallabstrahlung größer. Der Gesamtpegel wird vorwiegend durch die tieferen Frequenzwerte bestimmt, die bei der Aufstellungsart auf Rundstählen in jedem Falle den größeren Schallpegel ergeben. Bei höheren Frequenzen ist der Schallpegel für beide Aufstellungsarten annähernd gleich groß.

Als Abschluß der Untersuchungen an den Säulen wurden gleiche Messungen an einem Wandelement aus Mauerziegeln durchgeführt. Die Anregung zu Biegeschwingungen erfolgte in der Flächenmitte und die Bestimmung des Luftschallpegels entsprechend den Untersuchungen an den Säulen in 70 cm Wandabstand. Auch bei diesen Messungen wurden die beiden Aufstellungsarten, Aufstellung auf festem Untergrund und auf zwei Rundstählen, gewählt. Die Meßergebnisse sind in Tafel 5 und 6 eingetragen.

T a f e l    5

Aufstellungsart: Feste Unterlage

Mittel- frequenz des Emp- fangs- filters	Mittlerer Schallpegel bei Druckbelastung			
	0 kg/cm <sup>2</sup>	6,7 kg/cm <sup>2</sup>	13,4 kg/cm <sup>2</sup>	20,1 kg/cm <sup>2</sup>
350 Hz	55,55 dB	55,77 dB	57,06 dB	56,76 dB
700 Hz	72,49	70,62	65,39	65,60
1400 Hz	65,68	62,37	61,29	61,23
2800 Hz	65,23	62,70	62,33	64,24
Mittel- wert üb. Meßfre- quenzen	64,74 dB	62,87 dB	61,52 dB	61,96 dB

T a f e l 6

Aufstellungsart: Untergelegte Rundstähle auf fester Unterlage

Mittel- frequenz des Emp- fangs- filters	Mittlerer Schallpegel bei Druckbelastung			
	0 kg/cm <sup>2</sup>	6,7 kg/cm <sup>2</sup>	13,4 kg/cm <sup>2</sup>	20,1 kg/cm <sup>2</sup>
350 Hz	57,40 dB	56,36 dB	54,31 dB	52,49 dB
700 Hz	72,88	71,42	71,43	70,87
1400 Hz	65,90	64,24	64,45	64,43
2800 Hz	71,57	62,29	62,08	64,55
Mittel- wert üb. Meßfre- quenzen	64,44 dB	63,58 dB	63,07 dB	63,09 dB

Den Zahlenwerten ist zu entnehmen, daß der von der Wand-  
fläche abgestrahlte Gesamt-Schallpegel bei beiden Aufstellungs-  
arten mit zunehmender Druckbelastung absinkt. Die Abnahme des  
Gesamt-Schallpegels liegt auch bei diesen Untersuchungen in der  
Größe zwischen 1,5 und 2,5 dB, so daß diese Werte mit den an  
den Säulen erhaltenen Werten gut übereinstimmen.

Werden die gemessenen Schallpegel der einzelnen Frequenzwerte  
für beide Aufstellungsarten aufgetragen (s. Abb. 10), so ist

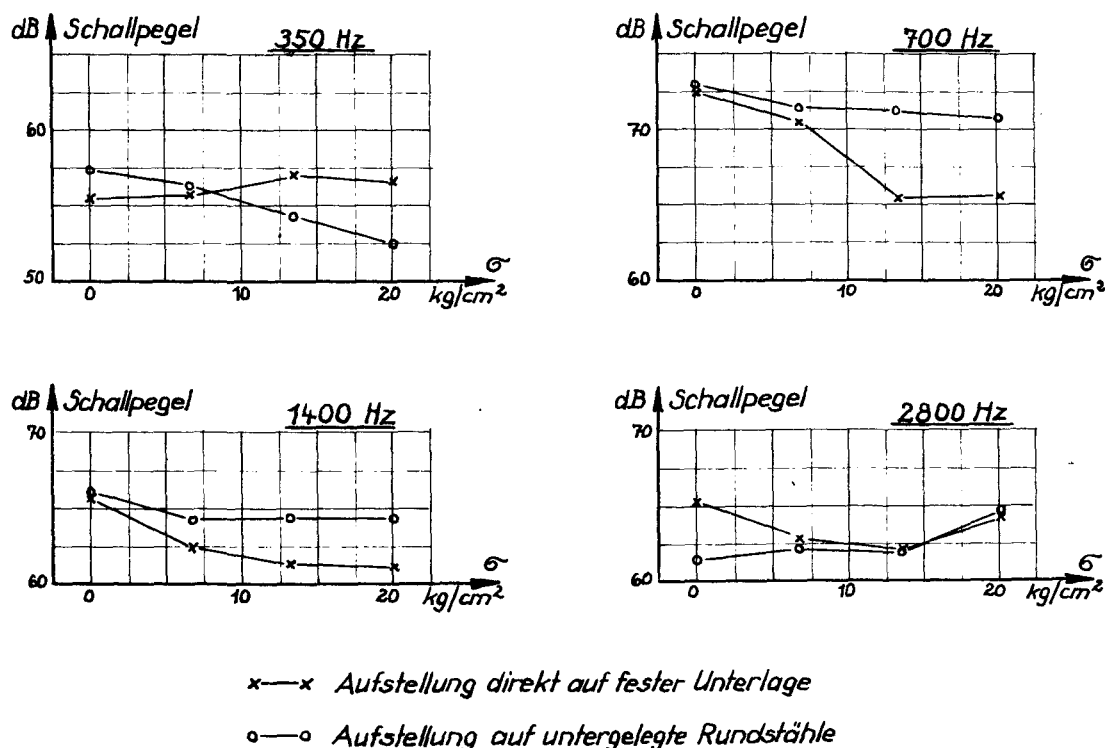


Abb. 10 Schallpegel für verschiedene Aufstellungsarten eines Wandelementes aus Mauerziegeln.

daraus zu ersehen, daß, sobald Rundstähle die Energieableitung behindern, die Schallabstrahlung größer ist als bei einer Aufstellung auf fester Unterlage. Die Pegelwerte sind direkt vergleichbar, da die körperschallmäßige Anregung mit gleicher Leistung erfolgte.

Grundsätzlich ist festzustellen, daß die Schallabstrahlung bei einem Wandelement im wesentlichen der Schallabstrahlung bei Säulen entspricht.

#### 4. Zusammenfassung

Beobachtungen in der Praxis gaben Veranlassung, die Schallabstrahlung von Bauteilen unter höheren Spannungsbeanspruchungen zu bestimmen. Da die Schallabstrahlung abhängig von den Biegeschwingungen, die von Bauteilen ausgeführt werden, ist, wurden sowohl die Biegeschwingungen als auch die Luftschallabstrahlung von Versuchskörpern in Abhängigkeit von der statischen Vorspannung untersucht.

##### 4.1 Bestimmung der Biegeschwingungen

Die Wellenlänge der Biegeschwingungen wurde sowohl bei Zug- als auch bei Druckbelastung der Versuchskörper (Beton, Mauerziegel und Porenbeton) ermittelt und dabei festgestellt, daß die Wellenlänge der Biegeschwingungen mit zunehmender Zugbeanspruchung geringer und mit zunehmender Druckbeanspruchung größer wird. Die Änderungen der Wellenlängen sind für die untersuchten Baustoffe unterschiedlich groß. Die größten Änderungen konnten für Porenbeton und die geringsten Änderungen der Wellenlänge für Beton festgestellt werden. Auf Grund experimentell gesicherter Erkenntnisse ist im allgemeinen mit einer Änderung der Biegewellenlänge eine Änderung der Elastizitätseigenschaften für den jeweiligen Frequenzwert verbunden. Die durch eine statische Vorspannung erfolgte Änderung der Biegewellenlänge äußert sich auf Grund der vorliegenden Untersuchungen in einer Veränderung der Elastizitätseigenschaften.

Der dynamische E-Modul muß aber für einen bestimmten Frequenzwert als konstant angesehen werden. Daher können diese Elastizitätsänderungen nicht reell sein, sondern es scheint nur so, daß durch Belastungen die Elastizitätseigenschaften der Versuchskörper verändert werden. Zunächst wird für diese Erscheinung die Bezeichnung "scheinbare Zusatzelastizität" benutzt.

Diese "scheinbare Zusatzelastizität" ist negativ bei einer Zug- und positiv bei einer Druckbeanspruchung. Darüber hinaus ist für die Zusatzelastizität eine deutliche Spannungs- und Materialabhängigkeit festzustellen. Als Ursache für das Auftreten der "scheinbaren Zusatzelastizität" muß die bei einer statischen Beanspruchung der Versuchskörper vorhandene Vorspannung angesehen werden. Diese Vorspannung äußert sich bei der Ausführung von erzwungenen Schwingungen der Versuchskörper durch eine scheinbare Verminderung (Zug) bzw. Vergrößerung (Druck) des dynamischen Elastizitätsmoduls.

#### 4.2 Bestimmung der Schallabstrahlung

Die Luftschallabstrahlung der Versuchskörper (Säulen und Wandelement) wurde bei verschiedener Druckbeanspruchung bestimmt. Dabei konnte eindeutig festgestellt werden, daß die Schallabstrahlung mit wachsendem Druck annähernd linear abnimmt.

Die Größe der Schallpegelabnahme ist materialabhängig und bei entsprechender Druckbeanspruchung für Versuchskörper (Säulen) aus Mauerziegeln größer als für Versuchskörper aus Beton. Der Schallpegel eines "weißen Geräusches" d.h. einer weitgehend gleichmäßigen Verteilung aller Frequenzwerte wird bei einem Belastungsunterschied von  $38,4 \text{ kg/cm}^2$  um die folgenden Werte herabgesetzt:

Beton : 1,5 dB      Mauerziegel : 2,6 dB.

Diese Meßwerte stimmen mit der in der Einleitung erwähnten Schalldämmzahl für ein belastetes Wandelement gut überein.

Nach DIN 1053 (Mauerwerk, Berechnung und Ausführung) wird eine Druckbelastung von  $38,4 \text{ kg/cm}^2$  nur selten in der Praxis vorliegen, jedoch wird eine Belastung von  $10 - 15 \text{ kg/cm}^2$  bei Wänden häufig zu finden sein. Bei dieser Belastung würde gegenüber dem unbelasteten Wandelement auch eine geringe Schallabstrahlung zu beobachten sein, deren Größe je nach dem Wandbaustoff zwischen  $0,5$  und  $1,0 \text{ dB}$  liegen würde.

Auf Grund der festgestellten Ergebnisse lassen sich die Streuungen, die stets bei Schalldämmungsmessungen in der Praxis an in gleicher Weise aufgebauten Wandkonstruktionen auftreten, bei Kenntnis der vorhandenen Druckbeanspruchung weiterhin eingengen.

Die Beobachtung, daß mit einem kleineren für den Schallenergieabfluß zur Verfügung stehenden Querschnitt die Schallabstrahlung der schwingenden Bauteile erhöht wird, hat vor allem für die Hochhäuser der Praxis besondere Bedeutung. Ist z.B. ein Gebäude auf Pfeilern errichtet, so wird damit die Querschnittsfläche, durch die Schallenergie abfließt, erheblich verringert und die Energieableitung herabgesetzt. Dadurch bleibt ein großer Teil der Schwingungsenergie in den Bauteilen des über den Pfeilern liegenden Geschosses, und deshalb strahlen diese Bauteile einen höheren Luftschallpegel gegenüber einer ungehinderten Körperschallenergie-Ableitung ab. Umgekehrt werden Erschütterungen innerhalb des Erdreiches auf Gebäude, die auf Pfeilern errichtet sind, weniger stark übertragen als auf Gebäude, die eine größere Berührungsfläche mit dem Erdreich besitzen.

Die durchgeführten Messungen der Luftschallabstrahlung an einem Wandelement aus Mauerziegeln ( $24 \times 200 \times 230 \text{ cm}$ ) bestätigen die an Säulen gewonnenen Ergebnisse. An diesem Wandelement konnte auch beobachtet werden, daß die Schallabstrahlung mit zunehmender Druckbelastung geringer wird. Je nach der Aufstellungsart dieses Wandelementes beträgt die Abnahme des Luftschallpegels bei einem Druck von  $20,1 \text{ kg/cm}^2$  (bei den Säulen  $38,4 \text{ kg/cm}^2$ ) gegenüber dem unbelasteten Zustand zwischen  $1,5$  und  $2,5 \text{ dB}$ .

Praktische Untersuchungen an homogenen Bauteilen (Wände und Decken) haben gezeigt und diese Erkenntnisse sind in DIN 4109 (Neubearbeitung) festgelegt, daß Wände mit  $350 \text{ kg/m}^2$  gerade einen ausreichenden Luftschallschutz besitzen. Während Decken, an die noch um 2 dB höhere schalltechnische Anforderungen zu stellen sind, bereits mit ca.  $310 \text{ kg/m}^2$  einen ausreichenden Schallschutz haben. Dieser Widerspruch zu dem Berger'schen Gesetz ließe sich auf Grund der beschriebenen Untersuchungen erklären: Decken (Stahlbetondecken) werden stets unter einer größeren statischen Vorspannung stehen als Wände entsprechender Größe und entsprechenden Gewichtes. Mit einer größeren statischen Vorspannung ist aber auch eine geringere Luftschallabstrahlung bei gleicher Anregungsleistung verbunden. Neben der statischen Vorspannung wird vermutlich auch die größere potentielle Energie einer Decke (gegenüber einer Wand) Einfluß auf die Schallabstrahlung besitzen.

Schrifttum:

- 1 Bisher unveröffentlichte Untersuchungen des Institutes für Baustoffkunde und Materialprüfung der T.H. Braunschweig
- 2 Cremer, L. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band III, Hirzel Verlag, Leipzig 1950
- 3 Schleicher Taschenbuch für Bauingenieure  
2. Auflage, Springer Verlag, Berlin 1955
- 4 Timoschenko, S. Schwingungsprobleme der Technik  
Springer Verlag, Berlin 1932